

## 論文内容の要旨

論文題目 構造構成要素の変形を考慮した工作機械の概念設計支援に関する研究

氏 名 三 島 望

工作機械は成熟産業としばしば言われるが，工作機械設計にはまだ様々な研究課題がある．工作機械の設計については，これまでに様々な経験の蓄積や体系化の努力が有り，設計マニュアルとして発刊されるまでに至っている．一方，近年，製品設計の分野ではコンカレント化が進んでおり，設計段階から製品の3次元形状データを保持し，それに基づいて生産工程，ロジスティックスなどのシミュレーションを計算機上で行えるようになってきている．製品設計のコンカレント化は当然ながらその製品化までの時間の短縮につながるが，あらゆる新設計の製品が既存の生産設備で製造可能であるとは限らず，生産設備側でも改造，新規設計等の期間短縮が求められる．また，生産のグローバル化に伴い，製品設計が先行し，それを生産するための工場建屋を含む生産設備を新規導入することも有り得る．この方向性に沿って，加工対象に対応した工作機械を既存設計例無しに設計するためには，設計時に試作によらないおおまかな設計評価を必要とする．試作，精度試験，トライアルアンドエラーによる修正などは工作機械の製作に重要な作業ではあるが，より効率的な工作機械設計を実現するためには，設計の初期段階である概念設計段階をより重視しなくてはならない．本研究では，工作機械の概念設計の高度化に資する手法の確立と提供を目的としている．そのうえで，具体的な目標として，本論文では以下の2つを定めた．

- (1) 工作機械の概念設計段階に適用できる設計評価手法の提案
- (2) 各種工作機械の設計指針の提示と検証

工作機械の加工動作は工具と工作物との相対的位置関係で決定されるが，その位置関係を解析的に記述する方法として形状創成理論が良く知られている．一般的には形状創成理論においては，熱変形，静荷重による変形などの内部変形については定量化が難しいことから扱わない，としている．しかし，軸構成，軸積層順，要素特性など，相対移動要素を剛体として取り扱うことによって得られる諸特性以外にも，構造構成要素の内部変形は，

工作機械の特性に大きく影響することが経験的に知られている。設計評価においては、これら内部変形と、既存の形状創成理論で評価可能な機械要素の誤差をあわせて、戦略的に重要度を比較検討することが求められる。本論文では、通常形状創成理論を拡張し、簡単な近似による内部変形の推定を導入している。まず各工作機械要素に付与した局所座標系間の変換を、工作物から工具まで順次行うことによって、形状創成理論に基づき、工作機械の加工動作を表す形状創成関数を導出する一般的手順について記述している。形状創成関数は、各々の座標変換に対応する同時変換行列の積によって表現されるが、工作機械の誤差を表す同時変換行列を要素間変換に際して付加することにより、工作機械に内在する熱変形、静的変形などの誤差要因を考慮した形状創成関数を計算することも示される。これら誤差を含む形状創成関数と含まない形状創成関数の差が形状創成誤差関数と呼ばれるベクトルであり、工作機械の目標位置からの理論的位置決め誤差を表す。本論文では、この理論的位置決め誤差を工作機械の性能を現す指標として用いることとし、得られた形状創成誤差関数に対して、ロバスト設計手法として一般的なタグチメソッドを適用して感度解析を行うことにより、工作機械の位置決め誤差に及ぼす工作機械の設計パラメータ、局所的誤差、構造などの影響を同定する方法を提案している。また、提案した手法を実際の工作機械設計に適用するため、旋盤、フライス盤の2つの工作機械モデルにおいて、各部の幾何学的局所誤差が物理的誤差要因とどのように関係付けられるかを決定している。その上で、形状創成誤差関数に含まれる多くの誤差要因がどのように仮定でき、どのような寸法効果を持つかを、先行の研究などを通じて整理している。

次の段階として、提案した評価手法および仮定した誤差量を一般的な工作機械構造である旋盤およびフライス盤に適用し、工作機械構造、設計パラメータ、局所誤差および局所誤差にマッピングされる物理的誤差要因などが全体性能に与える影響を示している。その結果、工作機械の構造としては、旋盤形式の場合は、もっとも一般的に見られる主軸固定式、フライス盤形式の場合はXYテーブルを有する方式の理論的性能が最も良いことが示される。また、誤差要因については姿勢度誤差などの角度誤差の影響、特にフライス盤形式の工作機械では主軸の軸方向熱変位の影響が大きいことなどが明らかにされる。ここまでで、工作機械の概念設計支援手法の基礎およびその手法を既存の工作機械形式に適用して設計指針を得る方法を示したが、さらに、この方法を新しい工作機械構造に適用し、工作機械の設計コンセプトが異なる際の性能比較を試みる。比較の結果、ほぼ同等の加工領域を有するフライス形式の工作機械の場合、計算される位置決め誤差量は、片持ち式、門型、ハイブリッド型ないしパラレルリンク型となり、新しく提案されている工作機械形式が理論的位置決め誤差の面で既存の形式に比べて有利であることが確認される。

さらに、本概念設計手法の適用対象として、いわゆるマイクロ工作機械が有望かつ必要性が高いと考えられることから、フライス盤形式を対象に小型化設計指針の導出を試みている。計算の結果、数mm程度までの加工を行うフライス盤の最適サイズは、おおむね現行の工作機械の1/10程度の小型化が有利であることも明らかにしている。構造に関しては、

マイクロ工作機械の場合も、普通工作機械の場合と特に目立った差異は無く、フライス盤形式では12036形が理論的には最も良い。また、最も影響の大きい設計パラメータについても普通工作機械と同様に主軸中心の高さであった。一方、重要な誤差要因に関しては普通サイズの工作機械と違いが見られ、普通工作機械では直動機構の角度誤差の影響が大きいのに対し、マイクロ工作機械では直動機構の真直度誤差の影響が比較的大きい。ただし損失熱に起因する主軸ユニットの軸方向伸びの影響はどちらの工作機械でも重要であった。これらの計算結果を、マイクロファクトリと呼ばれる超小型生産システムの研究において開発したマイクロ工作機械の実機と比較している。試作機は構造、寸法などが概ね得られた設計指針に沿って設計、製作されている。試作機の位置決め性能の実測結果と計算結果を比較した結果、実際の位置決め誤差量はほぼ予測の範囲内にあった。これらの検討の結果、本論文の方法による設計評価が、特にマイクロ工作機械を対象とした場合、簡便かつ有効な概念設計支援手法であることを確認した。

最後に論文全体のまとめとして、研究によって得られた工作機械の設計指針に関する知見を整理して再度記述するとともに、本研究の結果、工作機械の概念設計支援に関わる上記の2つの具体的目標は十分に達成されたことを述べている。具体的には、各種の工作機械について得られた設計指針は熟練設計者からの聞き取り調査により得られた概念設計に関する知見と一致し、本設計評価手法が既存設計知識と矛盾しないことが定性的に確認された。また、特にマイクロ工作機械については、設計指針に基づいて設計した試作機の実測結果は、計算結果と良い一致をみた。設計が既存の工作機械の小改造である場合、戦略的概念設計支援を目的とする本方法の有効性は限定されたものであるが、マイクロ工作機械、新しい構造の工作機械など、既存の設計知識の蓄積が期待できない場合には、最初から詳細な計算モデルを構築する場合に比べて、本手法に基づく解析を経ることにより、設計の手間を削減できることを主張している。今後、手法の実用性を高め、製品オリエンテッドな設計手法として確立して行くためにはいくつかの問題点を解決する必要がある。しかし、昨今の工作機械産業を取り巻く状況においては、設計の概念段階において設計評価（デザインレビュー）を行って概念設計の効率化を行う必要性があり、そのためには本研究で提案した、設計のラフスケッチを描くこととの同質性、同時性を特徴とした概念設計支援手法が適していることは十分に主張できたと考える。